

Deux techniques de visualisation de l'écoulement pariétal d'un fluide tournant au voisinage d'un disque fixe

A. NOUREDDINE^a, F.Z.MEDJAOU^b

a,b Laboratoire de Mécanique appliquée Faculté de Génie Mécanique U.S.T.M.B.Oran, BP 1505 Oran El M'Naouer, ALGERIE

Résumé :

Les différentes méthodes de visualisation des lignes de courant pariétales au voisinage d'un disque fixe ont constitué un outil important pour vérifier les résultats théoriques concernant le champ de vitesses. Cet article propose une comparaison entre deux techniques de visualisation, l'une par dépôt électrolytique et l'autre par filets colorés, appliquées à l'écoulement d'un fluide tournant au voisinage d'un disque fixe. Deux méthodes de visualisations sont ainsi confrontées à des résultats théoriques obtenus grâce à une méthode de Newton utilisant la technique itérative à tir corrigé.

Abstract :

The various visualization methods of the parietal threads of current in the vicinity of a fixed-head disk constitute a significant tool to verify the theoretical results concerning the velocity field. This article proposes a comparison between two visualization techniques, one by electrolytic deposit and the other by coloured nets, applied to the flow of a revolving fluid in the vicinity of a fixed-head disk. These two visualization methods are thus confronted with theoretical results obtained from using the shooting iterative Newton method.

Mots clefs: visualisation, disque fixe, dépôt électrolytique, écoulement pariétal, ligne de courant pariétal.

1 Introduction

Les écoulements entre deux disques coaxiaux ont fait l'objet d'un intérêt constant de la part de la communauté scientifique depuis les travaux de Von Karman [1] qui étudia l'écoulement laminaire au dessus d'un disque tournant de rayon infini dans un fluide initialement au repos. Bodewadt [2], lui a effectué une étude numérique de l'écoulement autour d'un disque fixe quand le fluide situé à l'infini est en état de rotation de bloc. Dans notre article on applique la technique de visualisation par dépôt électrolytique à l'étude de l'écoulement d'un fluide visqueux entre un disque tournant et un disque fixe [3, 4]. Les lignes de courants pariétales visualisées au voisinage de la surface du disque fixe sont formées de spirales qui partent du centre jusqu'à la périphérie du disque. A cet effet on définit α_{FP} comme étant l'angle compris entre la tangente à ces lignes de courant et le rayon vecteur du disque fixe. Les résultats obtenus correspondent à différents paramètres (e : épaisseur entre les deux disques, r : rayon et N : nombre de tours/min). Le nombre de Reynolds de rotation est défini par la relation (1)

$$Re = \frac{\omega e^*{}^2}{\nu} \quad (1)$$

où ω est la vitesse de rotation du disque tournant (rad/s), e^* est l'épaisseur dimensionnelle du jeu entre les deux disques et ν la viscosité cinématique du fluide utilisé. Les expériences que nous avons pu réalisées nous ont montré aussi les limites des deux techniques de visualisation. Cependant, la nature centripète de l'écoulement au voisinage du disque fixe a été mise en évidence lors de nos expériences.

2. Visualisation des lignes de courant pariétales par dépôt électrochimique

Lors de l'électrolyse d'une solution de sulfate de cuivre entre deux électrodes métalliques, l'électrode portée au potentiel négatif (cathode) se recouvre progressivement d'une pellicule de cuivre. Si par contre, l'électrode portée au potentiel le plus élevé (anode) est en cuivre, la teneur en ion cuivre de la solution demeure invariable au cours du temps. La quantité de cuivre se déposant à la surface de la cathode étant compensée par celle dissoute au niveau de l'anode. Le dépôt de Cu obtenu à la surface de la cathode présente une surface parfaitement unie pour des densités de courant d'électrolyse normales même en présence d'un mouvement relatif de l'électrode par rapport à la solution. Si au contraire on introduit au sein de la solution un produit désigné dans la littérature par le nom « d'agent visualisant », des lignes dues à des différences de vitesse de dépôt électrolytique se dessinent à la surface de la cathode. Une explication de ce phénomène [5] est qu'une réaction hétérogène dans des « conditions convenables » provoque de faibles irrégularités à la surface de l'électrode. Dans le sillage de ces irrégularités (aspérités ou dépressions) le taux de la réaction chimique correspondant au dépôt de cuivre est différent de celui existant en un point normal de la paroi. Il s'en suit donc l'apparition d'une légère irrégularité du dépôt dans le sillage. Lorsque l'épaisseur de la couche de diffusion est petite devant celle de la couche limite dynamique, on peut démontrer [6] qu'à l'intérieur de la couche de diffusion, les lignes de courant peuvent être pratiquement confondues avec les lignes de courant pariétales de la couche limite dynamique au sein de laquelle le fluide a les mêmes propriétés physiques que le fluide extérieur. Ainsi les sillons qui se forment à la surface de l'électrode au bout de quelques minutes d'électrolyse, correspondraient aux lignes de courant pariétales. La vérification la plus courante de cette hypothèse a été réalisée par de nombreux expérimentateurs [3, 6, 7, 8, 9, 10] dans le cas de l'écoulement engendré par un disque tournant au sein d'un milieu non confiné au repos.

3. Montage expérimental

Le dispositif utilisé lors des essais est schématisé (figure 1). L'ensemble disque fixe disque tournant dont l'écartement et le parallélisme ont été réglés au préalable sont placés à l'intérieur d'une cuve cylindrique de 500 mm de diamètre et de 300 mm de hauteur.

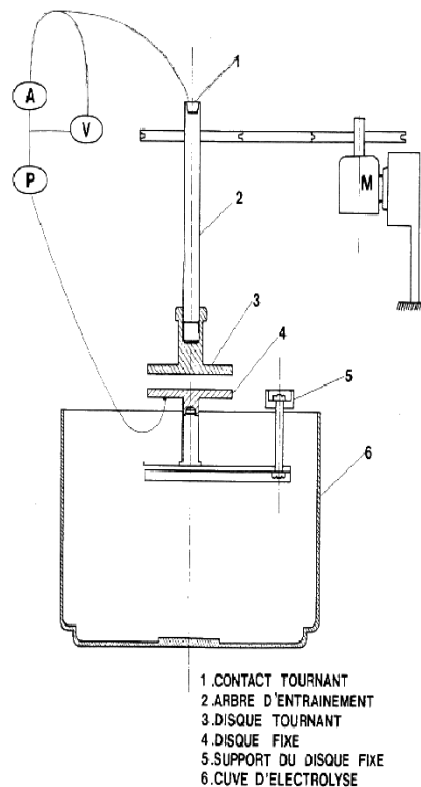


FIG. 1 – Montage expérimental

Ce récipient qui contient la solution électrolytique repose sur un plateau doté d'un mouvement vertical d'amplitude maximum 2540 mm. Ce système de déplacement utilisant un vérin pneumatique, il permet de placer les disques au sein du bain d'électrolyse avant chaque opération de visualisation et de le dégager rapidement à la fin de chaque expérience afin de procéder à l'observation. Chaque disque a un diamètre de 166 mm et a été réalisé en deux exemplaires, l'un en cuivre et l'autre en duralumin. Le disque en duralumin est utilisé comme cathode lorsqu'on désire visualiser l'écoulement pariétal sur ce même disque. Le disque de cuivre joue au contraire le rôle d'anode pour obtenir une visualisation sur le disque opposé. Le disque tournant est fixé à l'extrémité d'un arbre vertical. Cet arbre est relié à un bâti par un ensemble de deux paliers munis de roulements à billes qui lui assurent une liberté de rotation. Ce dispositif associé à différents rapports de diamètres des poulies a permis d'obtenir des vitesses de rotation du disque comprises entre 1,1tr/s et 9,10 tr/s. Le contrôle de cette vitesse est assuré de manière continue lors d'un essai par l'intermédiaire d'une cellule photoélectrique associée à un compte tours électronique. L'erreur relative ainsi commise sur la mesure de N est inférieure à 0,5%. Le disque fixe est solidaire d'un système de déplacement micro-métrique suivant trois directions orthogonales. L'ensemble est relié à un châssis doté également de vis calantes permettant d'obtenir le parallélisme entre les disques fixe et tournant. Ce réglage étant effectué, le système de déplacement micrométrique permet d'assurer la coïncidence des axes des deux disques et de positionner le disque fixe à la distance désirée du disque tournant. La précision des déplacements est de 10^{-2} mm mais l'erreur sur la valeur du jeu est évaluée à 0,2mm.

4. Résultats et discussion

Les mesures de l'angle α_{FP} compris entre la tangente aux lignes de courant pariétales et le rayon vecteur ont été effectuées à partir des visualisations de l'écoulement sur le disque fixe. Lorsque le nombre de Reynolds n est pas trop important, les courbes de α_{FP} sont caractérisées par une ordonnée constante (palier) pour les petites valeurs de r . Sur la (figure 2), l'ordonnée de ce palier a été portée en fonction du Reynolds correspondant pour plusieurs valeurs de l'épaisseur réduite du jeu. La dispersion des points expérimentaux est plus ou moins importante et leur ordonnée est toujours supérieure à la valeur théorique correspondante. L'écart entre théorie et expérience diminue au fur et à mesure que Re augmente mais la comparaison n'est plus possible à partir de $Re = 80$. Il paraît que cette valeur coïncide avec celle de Bodewadt [2] dans le cadre des hypothèses de la couche limite.

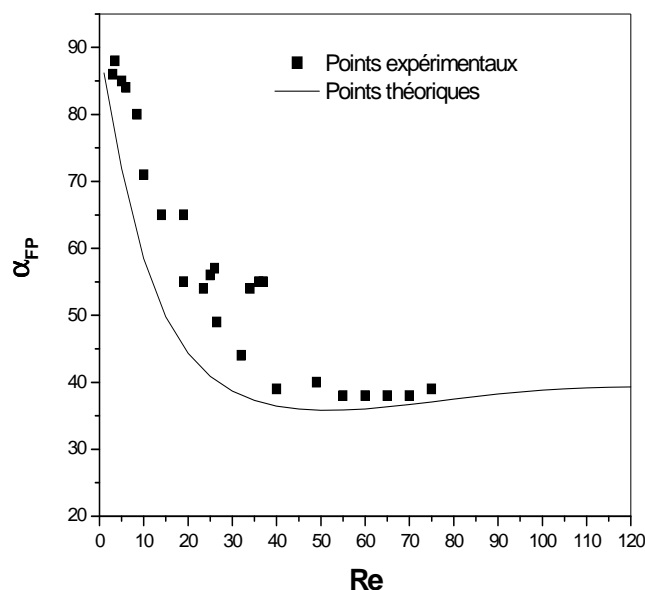


FIG. 2 – Variation de α_{FP} en fonction du nombre de Re .

La valeur de α_{FP} obtenue est alors 39,4 degrés ; celle déduite des résultats obtenus à partir des mêmes hypothèses par Rogers et Lance [11] est de 39,6 degrés. La comparaison entre ces valeurs limites et celle tirée de la (figure 2), à savoir 40 degrés, permet de constater que le régime de couche limite est atteint à proximité du disque fixe dès que Re dépasse 80. Au delà de cette valeur, les effets d'entrée liés à la dimension radiale finie des disques sont prépondérants dans tout le jeu. On dispose en plus des résultats de cette étude, des valeurs expérimentales obtenues grâce à la méthode des filets colorés. Dans une série d'expériences, Trochet [12] a visualisé l'écoulement pariétal au moyen de filets d'iode produits par électrolyse d'une solution aqueuse d'iodure de potassium à la surface de micro-électrodes incluses dans la paroi du disque fixe. Une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus à partir de cette dernière et celle du dépôt électrochimique est présentée par les graphes des (figures 3) et (figure 4). Les paramètres e^*/r_0^* sont très proches et le nombre de Reynolds correspondant à chacune des techniques de visualisation est respectivement voisin de 55 et 77. On constate que pour les deux exemples choisis l'accord entre les deux méthodes est satisfaisant, ce qui tend à montrer que pour des nombres de Reynolds variant entre 40 et 80 à peu près, les deux techniques conduisent au même résultat.

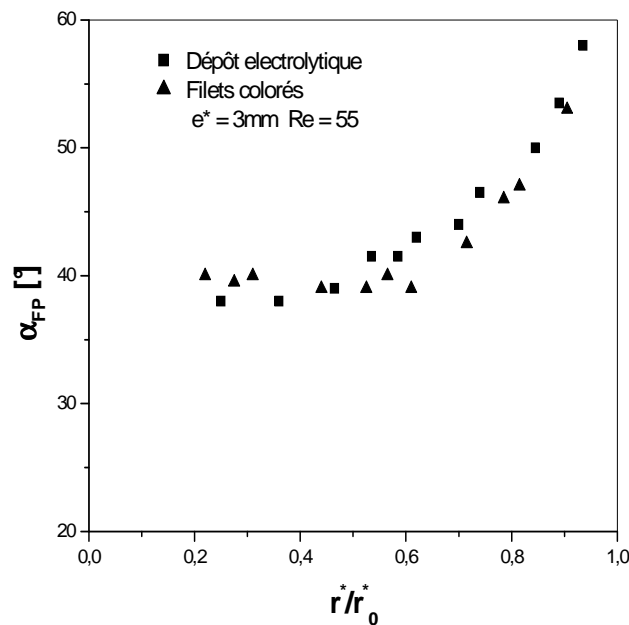


FIG. 3 – Variation de α_{FP} en fonction de $\frac{r^*}{r_0^*}$ pour les deux méthodes expérimentales pour $Re = 55$

Les valeurs de α_{FP} obtenues par Trochet ont été portées en fonction de Re (figure 5) où elles sont comparées avec la courbe théorique et les résultats expérimentaux obtenus par nos travaux. Pour les faibles valeurs du nombre de Reynolds, la technique des filets colorés est en très bon accord avec le résultat du calcul, ce qui montre qu'il n'y a pas d'anomalie du point de vue hydrodynamique. Pour $Re \approx 40$, les points expérimentaux s'écartent de la courbe théorique et rejoignent ceux obtenus par la méthode du dépôt électrolytique. A ce niveau la valeur de l'angle α_{FP} est supérieure d'environ 2 degrés à celle prévue par la théorie. Pour les valeurs de $Re \leq 40$ par contre, la technique du dépôt électrolytique conduit à une visualisation qui n'est pas celle des lignes de courant pariétales de l'écoulement. Les valeurs des angles mesurés correspondent en fait à celles caractérisant l'écoulement à une certaine distance de la paroi.

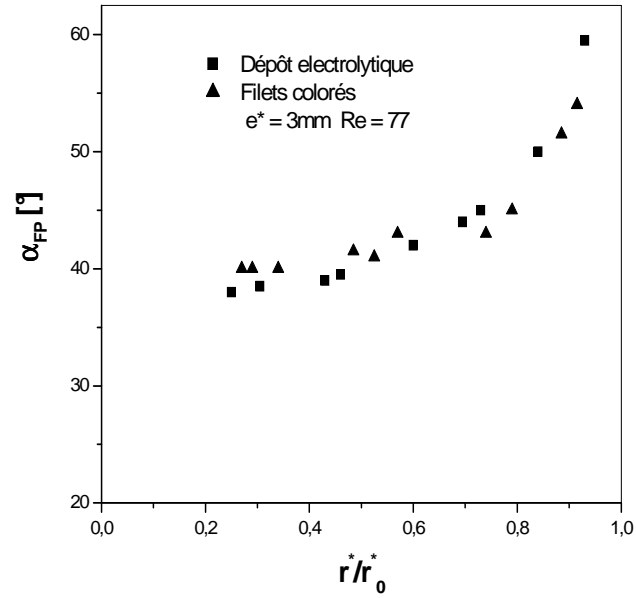


FIG. 4 – Variation de α_{FP} en fonction de $\frac{r^*}{r_0^*}$ pour les deux méthodes expérimentales pour $Re=77$

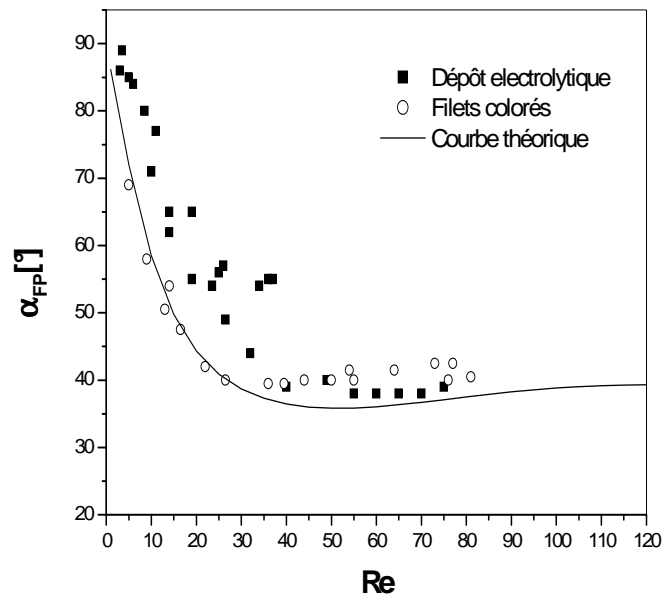


FIG. 4 – Variation de α_{FP} en fonction de Re pour les deux méthodes expérimentales et les résultats théoriques

5. Conclusion

La comparaison entre les résultats des calculs théoriques effectués dans le cadre de l'hypothèse d'affinité et les valeurs expérimentales correspondantes montre que la technique de visualisation par dépôt électrolytique donne des résultats satisfaisants aux grands nombres de Reynolds. Elle semble par contre moins bien adaptée lorsque la valeur de ce paramètre est inférieure ou égale à 40. On observe alors une divergence croissante entre théorie et expérience au fur et à mesure que ce nombre diminue. Le dépôt électrolytique effectué sur la surface du disque fixe paraît alors mettre en évidence non pas l'écoulement pariétal mais plutôt celui situé dans une zone de plus en plus éloignée de la paroi. L'écart entre théorie et expérience diminue au fur et à mesure que Re augmente mais la comparaison n'est possible que jusqu'à Re voisin de 80. Au delà de cette valeur, les effets d'entrée liés à la dimension finie des disques sont prépondérants dans tout le jeu existant entre les deux disques [13]. Ceci est en accord avec des mesures du champ des vitesses effectuées à la périphérie du jeu entre les deux disques par vélocimétrie Laser dans le cadre des travaux de Oliveira [14]. Ses résultats ont montré qu'une proportion importante de l'écoulement centrifuge de la couche limite du disque tournant est recirculée au niveau du disque fixe. L'application de la technique de visualisation par dépôt électrochimique à ce type d'écoulement nous a permis de constater que le régime de couche limite est atteint à proximité du disque fixe dès que le Reynolds dépasse 80.

References

- [1] Von Karman T., Über laminare und turbulente Reibung. *Z. Angew. Math. Mech.*, 1:233–252, 1921.
- [2] Bödewadt U.T., Die Drehströmung über festem Grunde. *Z. Angew. Math. Mech.*, 20:241–253, 1940.
- [3] Tuhault J.L., Mise en oeuvre et conditions d'application d'une méthode électrochimique de visualisation des lignes de courant pariétales. Thèse de 3ème cycle -Poitiers -(France) ,1973.
- [4] Noureddine A., Application de la technique de visualisation par dépôt électrolytique à l'écoulement d'un fluide visqueux entre un disque tournant et un disque fixe. CIMASI'96, Casablanca (Maroc),1996.
- [5] Laghouiter F., Daguinet A., Bodiot D. and Daguinet M., Visualisation électrochimique des lignes de mouvement pariétales d'un fluide. Application à la mise en oeuvre de la dimicroélectrode. *J.Cim. Phys.* 72 N° 2, 1975.
- [6] Daguinet M., Peube J-L., Sur une méthode de visualisation des lignes de courant pariétales. *C.R. Acad.de Paris.T.272 P.351-354, série A*, 1971.
- [7] Johnson G.R. and Turner K.J., The effect of some addition agents on the kinetics of copper electrodeposition from a sulphate solution. *J. of the Electrochem Society* 918-922, 1962.
- [8] Rogers G.T. and Taylor K.J., Effect of small protusions on mass transport to a rotating-disk electrode. *Nature, Lond.* 200.1062, 1966
- [9] Rogers G.T. and Taylor K.J., The effect of potential on the reactions of coumarin in the electrodeposition of nickel. *Electro Acta Vol. 13*, P. 109-117, 1968.
- [10] Hill M.R.H., Rogers G.T. and Taylor K.J., The cause of spirals on electrodeposits formed on a rotating disk electrode. *J. Electro Chem.* 96, P. 87-93, 1979.
- [11] Rogers M.H. , Lance G.N., The rotationally symmetric flow of a viscous fluid in the presence of an infinite rotating disk. *J. Fluid Mech.* 7 , 617,1960.
- [12] Trochet J.J., D.E.A de Mécanique des fluides, Poitiers, 1972.
- [13] Noureddine A., Medjaoui F.Z. , Analyse des phénomènes d'entrée et de bord à travers un écoulement confiné entre deux disques coaxiaux, 19ème Congrès Français de Mécanique Marseille, 24-28 août 2009.
- [14] Oliveira L.A., Contribution à l'étude de l'écoulement entre un disque fixe et un disque tournant; influence des phénomènes d'entrée liés à la valeur finie des rayons, Thèse de Docteur Ingénieur, Poitiers, France, 1981.